

**Marek JAŠEK<sup>1</sup>**

## **ODEZVA ZDĚNÉHO SLOUPU PŘI ZESÍLENÍ CEMENTOVÝM KOMPOZITEM ECC**

### **RESPONCE OF MASONRY COLUMNS FOR STRENGTHENING WITH CEMENT COMPOSITE ECC**

#### **Abstrakt**

Při zesilování zděných sloupů a pilířů se často používá tradiční metoda zesílení pomocí ocelové bandáže. V posledních letech se rovněž objevují nové pokročilé inovační materiály. Příspěvek se zabývá možností využití nového inovačního materiálu při zesilování zděných sloupů a to cementového kompozitního materiálu ECC.

#### **Klíčová slova**

Zděný sloup, zesilování zdiva, cementový kompozit ECC.

#### **Abstract**

The traditional method of reinforcement using steel banding is often used for strengthening of masonry columns and pillars. In recent years, there are also new advanced materials and innovative technology. The paper deals with possibilities of new innovative materials for strengthening of masonry columns with cement composite material ECC.

#### **Keywords**

Masonry columns, strengthening masonry, cement composite material ECC.

## **1 ÚVOD**

V posledních letech se můžeme setkat s novými pokročilými inovačními materiály a technologiemi, které se objevily na stavebním trhu nebo jsou teprve v pokročilé fázi výzkumu. Tyto novodobé materiály a technologie nacházejí ve stavebnictví využití nejen při návrhu nových konstrukcí a prvků, ale také při opravách, rekonstrukcích a zejména z důvodu stávajících konstrukcí při zesilování. Jedním z těchto novodobých materiálů je cementový kompozit ECC (Engineered Cementitious Composites). V rámci tohoto příspěvku je pojednáno o problematice statického posouzení tohoto vyztuženého zděného sloupu.

Početní posouzení únosnosti a spolehlivosti zesíleného zděného sloupu je realizováno na výpočetních modelech vypracovaných ve výpočetním softwaru ANSYS verze 12.

Porovnání je provedeno na zděném sloupu o půdorysných rozměrech 440 x 440 mm o dané výšce ( $v = 3,0$  m) při zesílení výše uvedeným materiálem. Jako výchozí srovnávací model je zvolen nezesílený zděný sloup viz (Jašek, 2011).

## **2 KOMPOZITNÍ MATERIÁL ECC**

V posledních letech se setkáváme s celou řadou nových typů betonů, nebo spíše by se už mělo použít pojmenování kompozity, které jsou poměrně vzdálené klasickému betonu. Kompozitní

---

<sup>1</sup> Ing. Marek Jašek, Katedra pozemního stavitelství, Fakulta stavební, VŠB-Technická univerzita Ostrava, Ludvíka Podéště 1875/17, 708 33 Ostrava - Poruba, tel.: (+420) 597 321 927, e-mail: marek.jasek@vsb.cz.

materiál ECC (Engineered Cementitious Composites) představuje velmi tvárný jemnozrnný beton (malta) s maticí na bázi portlandského cementu vyztuženou krátkými vlákny. ECC kompozit představuje novou generaci vysokohodnotného betonu (HPC – High Performance Concrete) a také bývá označován jako ohebný beton. Tento kompozitní materiál neobsahuje jako plnivo hrubé kamenivo, nýbrž obsahuje jen drobné kamenivo o velikosti v řadu  $\mu\text{m}$  nebo maximálně v mm. S ohledem na tuto skutečnost by se spíše mělo jednat o cementovou maltu nebo pastu (Li, 2008). V odborné literatuře se však ujal pojem beton.

## 2.1 Mechanicko-fyzikální vlastnosti kompozitu ECC

Mechanické chování cementových kompozitů (betony, malty, pasty) vyjádřené pracovním diagramem lze rozdělit na fázi před vznikem trhliny a na fázi po vzniku trhliny, kdy dochází k výraznému rozvoji deformačního přetvoření v důsledku působícího zatížení (Kolisko, 2008).

Dle chování cementového kompozitu (materiálu) po vzniku trhliny (tzn. po překročení pevnosti při vzniku první trhliny) lze průběh křivky pracovního diagramu rozdělit na s chováním (Kolisko, 2008):

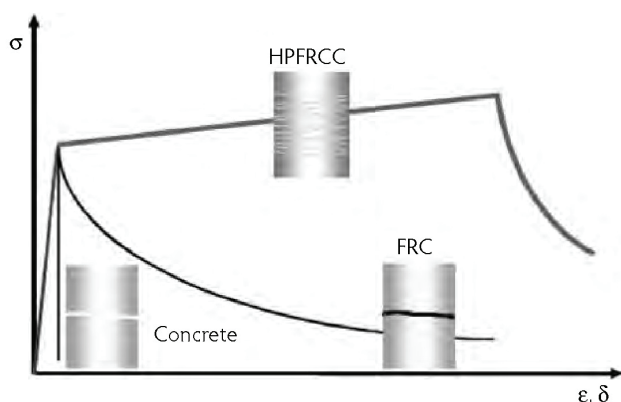
1. Strain-softening – po překročení pevnosti při vzniku první trhliny dochází k tzv. „deformačnímu změkčení“ materiálu a poklesu odolnosti materiálu přenášet zatížení. Do této skupiny lze zařadit beton s normální pevností (NSC – Normal Strength Concrete), včetně většiny vláken vyztužených betonů (FRC - Fiber Reinforced Concrete).
2. Strain-hardening - překročením pevnosti při vzniku první trhliny dochází k tzv. „deformačnímu zpevnění“ materiálu a k dalšímu nárůstu pevnosti (odolnosti) daného materiálu. Do této skupiny patří zejména kovové materiály, ale i kompozitní materiál ECC.

Jak je zřejmé z pracovního diagramu betonu s normální pevností (viz obr. 1), po překročení pevnosti při vzniku první trhliny dochází k prudkému poklesu křivky pracovního diagramu (tzv. „změkčení“) a následnému porušení kvazi-křehkým lomem. Vznik prvních trhlin v cementové matici má za následek následné porušení materiálu.

U vláken vyztuženého betonu (FRC) se po dosažení pevnosti při vzniku první trhliny dochází k tahovému „změkčení“ materiálu (viz obr. 1), tzn. k poklesu napětí při současném růstu poměrného přetvoření a k pozvolnému otevření trhlin až do mezního stavu, kdy je materiál porušen lomem. V této oblasti sestupné křivky pracovního diagramu se začíná projevovat účinek rozptýlených vláken, do kterých se převádí působící zatížení a vlákna přemostují a svazují vznikající trhliny v křehké matici. Během vlastního přemostování trhlin se vlákna deformují a vznikají další úzké trhlinky.

U kompozitního materiálu ECC naopak po dosažení pevnosti při vzniku první trhliny dochází k „zpevnění“ materiálu (viz obr. 1), tzn. k zvýšení napětí při současném růstu poměrného přetvoření až po dosažení meze pevnosti daného materiálu. Jak je zřejmé z tohoto pracovního diagramu, kompozitní materiál ECC se v první fázi fyzicky a mechanicky chová jako beton s normální pevností (NSC), ve druhé fázi se už spíše chová jako kov, kdy po dosažení meze „kluzu“ na konci pružné (první) fáze pracovního diagramu se objevují první trhliny. První trhlinka vzniká přibližně při hodnotě deformačního přetvoření  $\varepsilon \approx 0,01 \%$  a při deformačním přetvoření  $\varepsilon \approx 1 \%$  se šířka trhliny zvětšuje přibližně na  $60 \mu\text{m}$ . Při dalším zatížení se zvětšuje počet mikrotrhlin, ale šířka jednotlivých mikrotrhlin se nezvětšuje a zůstává ustálená na hodnotě  $60 \mu\text{m}$  (Li, 2008). K selhání dochází až tehdy, kdy se jedna z mnohonásobných trhlin poruší lomem (vytvoří se lomová plocha).

U kompozitního materiálu ECC se vytváří synergická interakce mezi vlákny, maticí daného kompozitu a rozhraním těchto materiálů. Dochází zde k rozvoji úzce rozložených mnohonásobných mikrotrhlin v důsledku mikromechanických vazeb. Účinná vazba mezi cementovou maticí a vlákny je zde dosažena prostřednictvím maximálního zhutnění, což má za následek vysokou pevnost po vzniku první trhliny až do okamžiku vyčerpání pevnosti vláken.



Obr. 1: Porovnání idealizovaných pracovních diagramů betonu s normální pevností (NSC), kompozitu FRC (Fiber Reinforced Concrete) a vysokohodnotného betonu HPFRCC (High Performance Fiber Reinforced Cementitious Composites) - typu ECC (Li, 2008)

Tento kompozit se oproti betonu s normální pevností (NSC) vyznačuje vynikajícími mechanickými vlastnostmi, a to zejména extrémní poddajností tzv. tvárností (duktilitou) - schopnost přetvářet se bez porušení (Kohoutková, 2007), houževnatostí, trvanlivostí (trvanlivost je až 10 krát vyšší než u betonu s normální pevností (NSC) (Li, 2008)) a dobrou adhezí čerstvého betonu. U kompozitního materiálu ECC mezní poměrné přetvoření (tvárnost) dosahuje hodnot 1 - 8 % viz tab. 1. Těchto základních mechanicko-fyzikálních vlastností je dosaženo bez závislosti na vysoký obsah vláken. Základní mechanicko-fyzikální vlastnosti lze přizpůsobit pomocí mikromechanických nástrojů (Li, 2008).

Tab. 1: Základní mechanicko-fyzikální vlastnosti kompozitního materiálu ECC (Li, 2008)

Pevnost v tlaku (MPa)	Pevnost při vzniku první trhliny (MPa)	Mezní pevnost v tahu (MPa)	Mezní poměrné přetvoření (%)	Modul pružnosti (Youngův modul) (GPa)	Pevnost v ohybu (MPa)	Hmotnost ( $\text{kg.m}^{-3}$ )
20-95	3-7	4-12	1-8	18-34	10-30	950-2300

Kompozitní materiál ECC se už v zahraničí začíná pomalu využívat v pozemním a dopravním stavitelství, u nás je tento kompozitní materiál teprve ve fázi laboratorního zkoumání. Mezi známé realizace patří např. oprava gravitační zemní záchytné stěny v Japonsku a mostovky na mostě v Michiganu apod. (Li, 2008).

### 3 STATICKÉHO POSOUZENÍ ZDĚNÉHO SLOUPU

Pro modelování zděného sloupu je používán detailní mikromodel vytvořený v nekomerční verzi softwaru ANSYS 12. Cihly a malta jsou po výšce rozděleny na dvě stejné části z důvodu vyhodnocení napětí či deformací v polovině výšky těchto prvků. Jako výpočtový model je zvolen zděný sloup o půdorysných rozměrech 440 x 440 mm a o výšce 3000 mm s mechanicko-fyzikálními vlastnostmi, které jsou uvedené v následujících tabulkách. U zděného sloupu je respektována řádná vazba zdiva. Sloup je modelován z celých cihel, resp. z tříčtvrtek.

Zděný sloup je zjednodušeně vymodelován jako konzolový prut bez uvážení vlivu vzpěry prvku. To proto, že prvek SOLID 65 nelze použít pro geometricky nelineární úlohy. Sloup je v patě vetknutý a v hlavě zatížen normálovou silou. Osová síla působí na hlavu sloupu prostřednictvím rovnoměrného plošného zatížení. Zatížení je do samotného zděného sloupu vnášeno pomocí tužšího spojovacího prvku o výšce 100 mm, který má stejné mechanicko-fyzikální vlastnosti jako cihla.

Vytvořením spojovacího prvku se snažíme docílit pokud možno co nejreálnějšího přenosu zatížení do zděného sloupu.

### 3.1 Vstupní údaje materiálů

Malta a cihly jsou modelovány jako 8 uzlový prvek SOLID 65 s isotropními vlastnostmi. Malta je na rozdíl od cihel modelována jako fyzikálně nelineární materiál. Při zadání fyzikálně nelineárního chování malty se vychází z Willam-Warnkeho podmínky plasticity viz (Willam, 1975). Do vstupních údajů nelineárního chování malty se dle (Willam, 1975) a (Ansys, 2010) zadává:

- Open Shear Transfer Coef: v rozmezí 0 – 0,5 (zadaná hodnota 0,4),  
 Closed Shear Transfer Coef: v rozmezí 0.5 – 0.9 (zadaná hodnota 0,7),  
 Uniaxial Cracking Stress:  $f_t$  (pevnost v tahu),  
 Uniaxial Crushing Stress:  $f_c$  (pevnost v tlaku),  
 Biaxial Crushing Stress:  $f_{bc} = 1,2 * f_c$ , (1)  
 Hydrostatic Pressure:  $\sigma_h = \sqrt{3} * f_c$ , (2)  
 Hydro Biax Crush Stress:  $f_l = 1,45 * f_c$ , (3)  
 Hydro Uniax Crush Stress:  $f_2 = 1,725 * f_c$ , (4)  
 Tensile Crack Factor: 0,6.

Mechanicko-fyzikální vlastnosti cihel a malty jsou převzaty z experimentálních zkoušek cihel a malty (Vorel, 2007) a hodnoty jsou uvedeny v tab. 2.

Tab. 2: Mechanicko-fyzikální vlastnosti cihly a malty (Vorel, 2007)

Mechanicko-fyzikální vlastnosti	Cihly	Malta
Objemová hmotnost ( $\text{kg.m}^{-3}$ )	1800	2000
Modul pružnosti v tahu a tlaku (GPa)	8,26	4,33
Součinitel příčné roztažnosti (Poissonův součinitel)	0,15	0,2
Pevnost v tlaku (MPa)	12,74	2,53
Pevnost v tahu (MPa)	1,83	0,58

Obetonování zděného sloupu při jeho zesílení pomocí ECC kompozitu je navrženo v tloušťce 60 a 80 mm. ECC kompozit je pak vymodelován jako 8 uzlový prvek SOLID 65 s izotropními vlastnostmi materiálu. Při modelování je uvažováno s dokonalým spolupůsobením zděného prvku a ECC kompozitu. Jednotlivé mechanicko-fyzikální vlastnosti ECC kompozitu jsou uvedeny v tab. 3.

Tab. 3: Mechanicko-fyzikální vlastnosti kompozitu ECC (Kajima Technical Research Institute, 2006)

Mechanicko-fyzikální vlastnosti	ECC
Objemová hmotnost ( $\text{kg.m}^{-3}$ )	1854
Modul pružnosti v tahu a tlaku (GPa)	17,5
Součinitel příčné roztažnosti (Poissonův součinitel)	0,2
Pevnost v tlaku (MPa)	37,5
Pevnost v ohybu (MPa)	4,9
Pevnost při vzniku první trhliny (MPa)	4,0
Mezní poměrné přetvoření (%)	3,7

Návrhová únosnost zděného sloupu o půdorysných rozměrech 440 x 440 mm a o výšce 3000 mm vypočtena dle ČSN EN 1996-1-1 je 170,75 kN. Normálová síla pro zatížení sloupu tlakem je zvolena o hodnotě 170 kN. Plošné zatížení zjištěné přepočtem na půdorysnou plochu pak vychází 878 kN/m<sup>2</sup>. Z důvodu zanedbání vzpěru je třeba brát výsledky spíše jako orientační.

### 3.2 Podklad statického posouzení zděného sloupu

Pro posouzení jednotlivých metod zesílení zděného sloupu je vybrána střední část sloupu od výškové úrovně +1,3925 do +1,8425 m, což odpovídá výškové úrovni od poloviny zdicích prvků (cihel) 18. řady do poloviny zdicích prvků 25. řady.

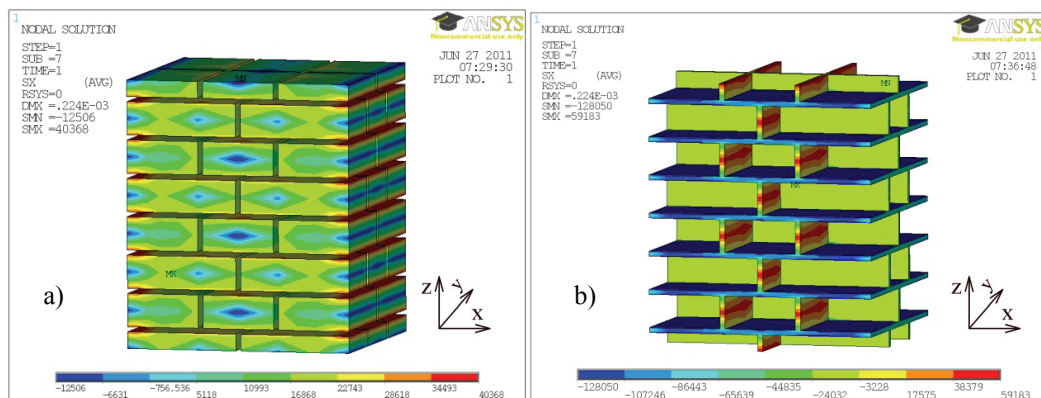
U zděného sloupu je posuzováno napětí ve směru osy  $x$  a  $z$  i deformace ve směru osy  $x$ . Pro posouzení zděného sloupu jsou jednotlivé zesilující prvky odelektovány a napětí se posuzují zvlášť pro zdicí prvky (cihly) a maltu. U posouzení deformace ve směru osy  $x$  jsou cihly a malta brány jako jeden společný prvek z důvodu minimálního rozdílu výsledných deformací v obou prvcích odpovídajících řádu 10<sup>-6</sup> m, přičemž deformace v maltě je nepatrně větší než deformace v cihlách.

V následujících tabulkách jsou použité zkratky, kde:

$\sigma_{x,max,c}$	je maximální napětí v cihlách ve směru osy $x$ ,
$\sigma_{x,max,m}$	maximální napětí v maltě ve směru osy $x$ ,
$\sigma_{z,max,c}$	maximální napětí v cihlách ve směru osy $z$ ,
$\sigma_{z,max,m}$	maximální napětí v maltě ve směru osy $z$ ,
$u_{x,sloup}$	maximální deformace zděného sloupu ve směru osy $x$ .

#### 3.2.1 Nezesílený zděný sloup

U nezesíleného zděného sloupu jsou největší tlaková napětí v cihlách ve směru osy  $x$  umístěna u povrchu zděného sloupu a to v polovině výšky cihel. Maximální tahová napětí se pak nacházejí v oblasti ložné spáry u povrchu zděného sloupu. Ve směru osy  $z$  jsou největší lokální tlaková napětí v místě vnitřních styčných spár.



Obr. 2: Nezesílený zděný sloup: a) napětí v cihlách ve směru osy  $x$ , b) napětí v maltě ve směru osy  $x$

V maltě jsou největší tlaková napětí ve směru osy  $x$  umístěna v ložných spárách, totéž platí i pro napětí ve směru osy  $z$ . V polovině výšky styčných maltových spár se nacházejí maximální tahová napětí ve směru osy  $x$ .

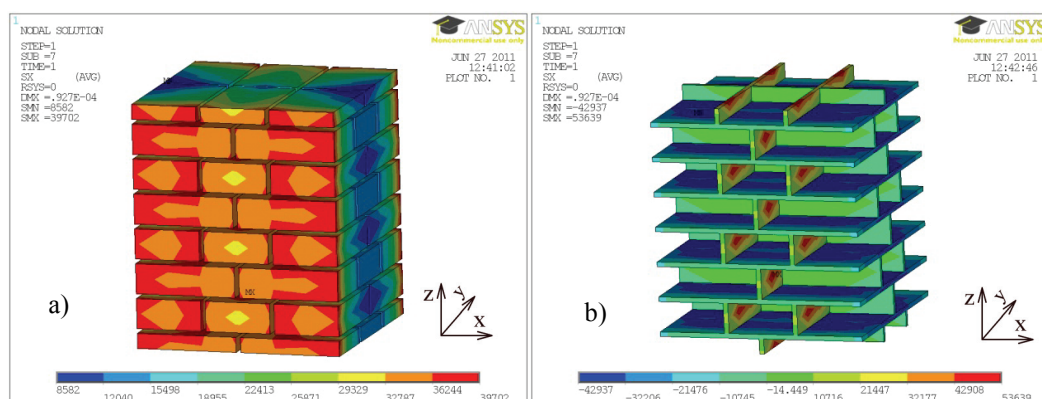
Na obr. 2 jsou znázorněna napětí nezesíleného zděného sloupu ve směru osy  $x$ , vlevo na obrázku je zobrazeno napětí v samotných cihlách a vpravo napětí v maltových spárách. Maximální tlaková a tahová napětí pro nezesílený sloup ve směru osy  $x$  a  $z$  jsou uvedeny v tab. 4.

Tab. 4: Výsledná maximální napětí a deformace pro nezesílený zděný sloup

$\sigma_{x,max,c}$ (kPa)	$\sigma_{x,max,m}$ (kPa)	$\sigma_{z,max,c}$ (kPa)	$\sigma_{z,max,m}$ (kPa)	$u_{x,sloup}$ (m)
-12,506	-128,050	-1060	-931,357	$4,39 \cdot 10^{-6}$
40,368	59,183			

### 3.2.2 Metoda zesílení pomocí ECC kompozitu

U metody zesílení pomocí ECC kompozitu o tloušťce 60 mm nedochází v cihlách k tlakovému namáhání ve směru osy  $x$ . Největší tahová napětí ve směru osy  $x$  se nacházejí u povrchu sloupu a její hodnoty přibližně odpovídají maximálnímu tahovému napětí v cihlách nezesíleného sloupu. Ve směru osy  $z$  je zřejmý rapidní pokles tlakového napětí v cihlách, které nám přebírá obetonování sloupu. Maximální hodnoty tlakového napětí v cihlách se nacházejí v místě křížení styčných spár, resp. v místě styku styčné spáry a obetonování ECC kompozitem.



Obr. 3: Metoda zesílení pomocí ECC kompozitu – tloušťka vrstvy 60 mm:

a) napětí v cihlách ve směru osy  $x$ , b) napětí v maltě ve směru osy  $x$

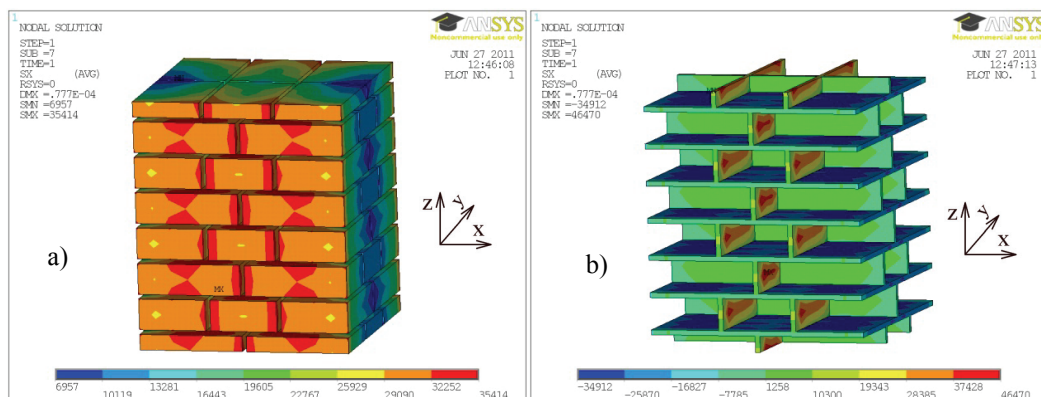
U tlakového napětí v maltě ve směru osy  $x$  taktéž dochází k poklesu napětí a to cca o 65 %. V případě tahového napětí v maltě ve směru osy  $x$  vychází pokles napětí nižší jen o 10 % oproti nezesílenému sloupu. Největší lokální napětí se nalézají v polovině výšky styčné spáry umístěné ve směru osy  $y$  a to přibližně ve vzdálenosti 1/3 třičtvrtěcí cihly od okraje sloupu. Největší lokální tlaková napětí v maltě ve směru osy  $z$  se nacházejí taktéž v ložné spáře ve vzdálenosti 1/3 třičtvrtěcí cihly od okraje sloupu. Deformace sloupu ve směru osy  $x$  se snížila přibližně o 45 %.

Tab. 5: Výsledná maximální napětí a deformace pro metodu zesílení pomocí ECC kompozitu- tloušťka vrstvy 60 mm

$\sigma_{x,max,c}$ (kPa)	$\sigma_{x,max,m}$ (kPa)	$\sigma_{z,max,c}$ (kPa)	$\sigma_{z,max,m}$ (kPa)	$u_{x,sloup}$ (m)
-	-42,937	-403,568	-421,807	$2,43 \cdot 10^{-6}$
39,702	53,639			

Jako u předešlé varianty ECC kompozitu, taktéž u tloušťky obetonávky 80 mm se v cihlách ve směru osy  $x$  nenacházejí žádná tlaková napětí. Průběh napětí v cihlách ve směru osy  $x$  a  $z$  je obdobný jako u ECC kompozitu o tloušťce 60 mm a výsledné maximální hodnoty napětí v cihlách mají cca o 10 % nižší hodnoty než u předešlé varianty.





Obr. 4: Metoda zesílení pomocí ECC kompozitu – tloušťka vrstvy 80 mm:

a) napětí v cihlách ve směru osy  $x$ , b) napětí v maltě ve směru osy  $x$

Jak je patrné z obr. 4, je průběh napětí v maltě taktéž obdobný jako u obetonování o tloušťce 60 mm. Výsledná maximální napětí, ať už ve směru osy  $x$  či  $z$ , jsou o několik procent nižší. Maximální deformace sloupu ve směru osy  $x$  vychází o 55 % menší než u nezesíleného sloupu. V tab. 6 jsou uvedeny hodnoty pro metodu zesílení pomocí ECC kompozitu o tloušťce 80 mm.

Tab. 6: Výsledná maximální napětí a deformace pro metodu zesílení pomocí ECC kompozitu – tloušťka vrstvy 80 mm

$\sigma_{x,max,c}$ (kPa)	$\sigma_{x,max,m}$ (kPa)	$\sigma_{z,max,c}$ (kPa)	$\sigma_{z,max,m}$ (kPa)	$u_{x,sloup}$ (m)
-	-34,912	-335,307	-330,536	$2,04 \cdot 10^{-6}$
35,414	46,470			

### 3.2.3 Vyhodnocení zesílení zděného sloupu

Pro srovnání dané metody zesílení zděného sloupu o půdorysných rozměrech 440 x 440 mm a o výšce 3000 mm je vybráno tahové napětí v maltě ve směru osy  $x$ , neboť první tahové trhliny ve zděném sloupu vznikají ve styčných maltových spárách. Při použití ECC kompozitu o tloušťce obetonování 60 mm dochází ke snížení tahového napětí v maltě ve směru osy  $x$  cca o 10%, u tloušťky obetonování 80 mm cca o 22%.

Při zatížení zděného sloupu tlakovou normálovou silou kolmou na ložnou spáru dochází k svislému poměrnému stlačení a vodorovnému poměrnému roztažení. Dalším možným kritériem pro srovnání dané metody zesílení je deformace zděného sloupu ve směru osy  $x$ , tzn. maximální hodnota vodorovného poměrného roztažení ve směru osy  $x$ .

Deformace zděného sloupu metody zesílení pomocí kompozitu ECC při tloušťce obetonování 60 mm dosahuje snížení cca o 45%, při použití obetonování tloušťky 80 mm pak cca o 44 % vzhledem k nezesílenému zděnému sloupu.

## 4 ZÁVĚR

Ze srovnání kompozitu ECC a nezesíleného zděného sloupu vyplývá, že metoda zesílení pomocí kompozitu ECC výrazně přispívá nejen ke snížení tahového napětí v maltě ve směru osy  $x$ , ale také ke zmenšení deformace zděného sloupu ve směru osy  $x$ . Jak je patrné z (Jašek, 2011), výsledné hodnoty (napětí ve směru osy  $x$  a  $z$ , deformace ve směru osy  $x$ ) metody zesílení zděného sloupu o půdorysných rozměrech 440 x 440 mm a o výšce 3000 mm pomocí kompozitu ECC jsou skoro totožné s tradiční metodou zesílení zděného sloupu pomocí ocelové bandáže. Z hlediska finančního vychází ECC kompozit oproti ocelové bandáži cca o 10 % dražší. Doba realizace zesílení pomocí ECC kompozitu je pak z důvodu technologické přestávky při tvrdnutí kompozitu cca 4 krát delší než u ocelové bandáže viz (Jašek, 2011). Z těchto důvodů vychází jako nejvhodnější metoda pro zesilování zděných sloupů metoda zesílení pomocí ocelové bandáže. Při zesilování zděných sloupů pomocí ocelové bandáže je ale nutné dodržovat technologickou kázeň při realizaci zesílení pro zajištění požadovaného spolupůsobení zesilovaného sloupu a zesilující konstrukce.

## LITERATURA

- [1] Ansys, Inc. 2010. *ANSYS Mechanical APDL Programmer's Manual : Release 13* [online]. Canonsburg : Southpointe, 11.2010 [cit. 2011-07-15]. Dostupné z [www: <http://www1.ansys.com/customer/content/documentation/130/ans\\_prog.pdf>](http://www1.ansys.com/customer/content/documentation/130/ans_prog.pdf).
- [2] JAŠEK, Marek. 2011. *Posouzení nových materiálů a technologií pro zesilování zděných konstrukcí*. Ostrava, 2011. 182 s. Disertační práce. VŠB - Technická univerzita Ostrava.
- [3] Kajima Technical Research Institute. 2006. *Mixing Manual of ECC Dry-Mix for Casting*, KaTRI, Japan. 2006.
- [4] KOHOUTKOVÁ, Alena. 2007. Betony s rozptýlenou výztuží. *Materiály pro stavbu*, 6/2007, Praha: Springer media CZ, 2007, s. 39-41. ISSN 1213-0311.
- [5] KOLÍSKO, Jiří. 2008. *Vliv krátkých všesměrně rozptýlených polypropylénových mikro a makrovláken na vlastnosti cementových malt a betonů*. Praha: České vysoké učení technické, 2008. 24 s., ISBN 978-80-01-04072-0.
- [6] LI, Victor C. 2008. *Concrete Construction Engineering Handbook*. Second Edition. Rutgers University, Piscataway, New Jersey, USA. Boca Raton: CRC Press, 2008. Engineered Cementitious Composite (ECC): Material, Structural, and Durability Performance, s. 1024-1069. ISBN 9780849374920.
- [7] VOREL, Jan; SÝKORA, Jan. 2007. Experimentální a numerická identifikace materiálových parametrů zdiva. In *9. Odborná konference doktorského studia Juniorstav*, Brno, 24. ledna 2007. Brno: Fakulta stavební, Vysoké učení technické, 2007. ISBN 978-80-214-3337-3.
- [8] WILLAM, Kaspar J.; WARNKE, E. P. 1975. *Constitutive models for the triaxial behavior of concrete*. Proceedings of the International Assoc. for Bridge and Structural Engineering. 1975, vol 19, pp. 1- 30.

### Oponentní posudek vypracoval:

Doc. Ing. Ladislav Klusáček, CSc., Ústav betonových a zděných konstrukcí, Fakulta stavební, Vysoké učení technické v Brně.

Doc. Ing. Jiří Kolísko, Ph.D., Kloknerův ústav, České vysoké učení technické v Praze.